

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-107428

(43)公開日 平成5年(1993)4月30日

(51)Int.Cl.⁵

G 0 2 B 6/32
6/30

識別記号

府内整理番号
7132-2K
7132-2K

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数4(全8頁)

(21)出願番号

特願平3-297900

(22)出願日

平成3年(1991)10月18日

(71)出願人

000006633

京セラ株式会社

京都府京都市山科区東野北井ノ上町5番地
の22

(72)発明者

柏崎 昭
東京都世田谷区玉川台2-14-9 京セラ

株式会社東京用賃事業所内

(72)発明者

奥田 通孝
東京都世田谷区玉川台2-14-9 京セラ

株式会社東京用賃事業所内

(74)代理人

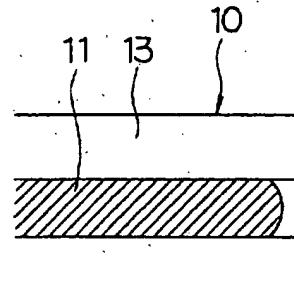
弁理士 熊谷 隆 (外1名)

(54)【発明の名称】 光ファイバの端部構造及びその製造方法

(57)【要約】

【目的】加工が容易で、他の光学部品との接続が安定し
て高効率に行える光ファイバの端部構造を提供すること。

【構成】光ファイバ10のコア11の端面を、光ファイ
バ10のクラッド13の端面よりも凹め、且つコア11
端面の形状をクラッド13の端面から突出しない範囲で
凸面形状に形成する。これによって光ファイバ10から
出射される光のスポットサイズが小さくでき、他の光学
部品との結合効率を良くできる。またコア11の端面が
クラッド13端面よりも凹んだ位置にあるためコア11
の端面が傷つくことはない。



【特許請求の範囲】

【請求項1】他の光学部品に接続される光ファイバのコアの端面が、該光ファイバのクラッドの端面よりも凹んでおり、且つ該コア端面の形状或いは該コア端面に取り付けられるレンズ部材の表面形状は前記クラッドの端面から突出しない範囲で凸面形状に形成されていることを特徴とする光ファイバの端部構造。

【請求項2】他の光学部品に接続される光ファイバの端部のコア径を拡大し、且つ該コア径を拡大したコアの端面に直接レンズ手段を取り付けたことを特徴とする光ファイバの端部構造。

【請求項3】他の光学部品に接続される光ファイバの端部のクラッドを除去してコアを所定長さだけ露出させ、該露出したコアの周囲にクラッドの屈折率よりも小さい所望の屈折率の樹脂をモールドしたことを特徴とする光ファイバの端部構造。

【請求項4】他の光学部品に接続される光ファイバの端部のクラッドをエッチングで除去してコアを所定長さだけ露出させる工程と、

該露出したコアの周囲にクラッドの屈折率よりも小さい所望の屈折率からなる樹脂をモールドする工程と、コアの端面を樹脂とともに研磨する工程とを具備することを特徴とする光ファイバの端部の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、光導波路や他の光ファイバ等に接続するのに好適な光ファイバの端部構造及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来技術】従来、光ファイバを光導波路や他の光ファイバ等に結合する際には接続損失が生じる。そして、該接続損失を生じさせる最も大きな原因是、シングルモードファイバの場合は、両者間のモードフィールド径の不整合にある。従って両者を効率良く結合させる最も有効な手段は、両者のモードフィールド径を一致させることであり、そのための方法としては、以下の3つの方法が挙げられる。なおここでは光ファイバと光導波路を結合する場合について説明する。

【0003】①光導波路のモードフィールド径を光ファイバのモードフィールド径に合わせるように光導波路デバイスの結合端部の構造を設計する方法。

【0004】例えば、光導波路の端面をレンズ効果を持った構造にして、光導波路よりも広がっている光ファイバからのビームを集光して光導波路のコア部に入射させる方法がある。

【0005】また、光導波路のコア部に補助導波路を接続して、光ファイバからの入射光を該補助導波路に全部入射させ、分布結合を利用して最終的に光導波路のコアに光を伝搬させていく方法もある（例えば特開昭55-2262号公報、特開昭60-172001号公報、特

公昭61-48695号公報）。

【0006】②光ファイバのモードフィールド径を光導波路デバイスのモードフィールド径に合わせるように光ファイバの結合端部の構造を設計する方法。

【0007】例えば、光ファイバの先端を先球状にしたり、光ファイバの端部近傍のコア形状を細くしたり変形（例えば円柱状）したりして、光ファイバ端部のコア形状を光導波路のコア部の形状に近づけ、両者の結合効率を高める方法（例えば特開昭57-100409号公報、特開昭57-30811号公報、特開昭60-88909号公報）。

【0008】また光ファイバ端部のコアとクラッドの比屈折率差を大きくしてスポットサイズを小さくして光導波路との結合効率を高める方法。

【0009】③光ファイバと光導波路デバイスの間に、互いのモードフィールド径が合うようなモードフィールド変換素子を介在させる方法（例えば特開昭60-164708号公報）。

【0010】一方、接続損失を生じる他の要因として、シングルモード、マルチモードに限らず、光ファイバと光導波路の屈折率の違いから生ずる端面反射による損失もある。

【0011】この反射損失を防止するための手段としては、光ファイバの端面あるいは光導波路の端面に反射防止膜をコーティングする方法が取られる（例えば特開昭57-10409号公報、特開昭60-164708号公報）。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら上記従来技術には以下のような問題点があった。上記①の従来技術の場合は、光導波路基板上への微細加工技術が必要とされ、しかも高精度が要求される。

【0013】例えば光導波路に補助導波路を分布結合により接続させる場合、光ファイバから補助導波路に入射した光のパワーが光導波路に移行する割合（結合率）は、光導波路と補助導波路の接続距離に対して周期的に変化する。このため、両者の結合長を設計どおりに精密に行わないと、良い結合効率が得られない。

【0014】上記②の従来技術の場合は、光ファイバを精度良く加工することが容易ではない。それに併せて先球状の光ファイバを光導波路の端面に固定する場合は、その固定方法が、通常の光ファイバの光導波路への固定方法（直接突き当てる接着剤で固定する方法）に比べて容易ではない。

【0015】上記③の従来例の場合も、モードフィールド変換素子自体の設計に精度が要求されその精度を精密に出さないと良好な結合効率が得られず、また結合面が光ファイバ～モードフィールド変換素子間と、モードフィールド変換素子～光導波路間の2箇所となり、接続損失を生じる箇所が増えてしまう。

30

30

30

40

40

50

【0016】一方、反射損失を防ぐために反射防止膜を用いた場合はコストがかかり、また反射防止膜の膜厚のコントロールを精度良く行わなければならぬ。

【0017】本発明は上述の点に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、加工が容易で、他の光学部品との接続が安定して高効率に行える光ファイバの端部構造及びその製造方法を提供することにある。

【0018】

【課題を解決するための手段】上記問題点を解決するため本発明は、光ファイバ10のコア11の端面を、該光ファイバ10のクラッド13の端面よりも凹め、且つ該コア11端面の形状或いは該コア11端面に取り付けたレンズ部材23の表面形状を前記クラッド13の端面から突出しない範囲で凸面形状に形成することとした。

【0019】また本発明は、光ファイバ30の端部のコア31の径を拡大し、且つ該コア径を拡大したコア31の端面に直接レンズ手段33を取り付けることとした。

【0020】また本発明は、光ファイバ51の端部のクラッド55を除去してコア53を所定長さだけ露出させ、該露出したコア53の周囲にクラッド55の屈折率よりも小さい所望の屈折率の樹脂57をモールドすることとした。

【0021】

【作用】光ファイバ10のコア11の端面を該光ファイバ10のクラッド13の端面よりも凹め且つ該コア11端面の形状或いは該コア11端面に取り付けられるレンズ部材23の表面形状を凸面形状に形成した光ファイバ10においては、該光ファイバ10端部のレンズ効果によって該光ファイバ10から出射される光のスポットサイズを小さくでき、他の光学部品との結合効率を良くできる。またコア11の端面がクラッド13端面よりも凹んだ位置にあるためコア11の端面が傷つくことはなく、しかも他の光学部品との接触面積を十分にとることができるので、安定した接続固定が行える。

【0022】コア31端部の径を拡大し且つ該コア径を拡大したコア31の端面に直接レンズ手段33を取り付けた構造の光ファイバ30においては、コア拡大部によりその有効開口径が大きくなっている、しかも付着したレンズ手段33によって該拡大したコア径以上に該光ファイバ30への入射開口径が大きくなる。従ってこの光ファイバ30を他の光学系に接続する際の位置調整は容易で、結合効率も高い。さらにこの光ファイバは長焦点距離がとれる。

【0023】端部のクラッド55を除去してコア53を所定長さだけ露出させ、該露出したコア53の周囲に樹脂57をモールドした光ファイバ50においては、コア53と樹脂57の屈折率の差をコア53とクラッド55の屈折率の差よりも大きくできる。従って光ファイバ50から出射される光のスポットサイズを小さくできる。

【0024】

【実施例】以下、本発明の実施例を図面に基づいて詳細に説明する。

【0025】【第1発明】図1は本発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。同図に示すようにこの光ファイバ10のコア11の端面は、クラッド13の端面と同一面となっておらず、コア11の端面の方がクラッドの端面よりも凹んでいる。またこのコア11の端面形状は凸レンズ状(球面状)に形成されている。このような構造とするためには、該光ファイバ10の端面をエッチングすればよい。

【0026】このように構成することにより該光ファイバ10のコア11端面から出射される光のビームスポットは絞られて小さくなる。

【0027】図2は上記光ファイバ10の端部を光導波路基板15に設けた光導波路コア17に接続したときの接続構造を示す概略側断面図である。同図に示すように光ファイバ10はそのコア11の光軸が光導波路コア17の光軸と一致するように接着剤19によって接着・固定される。

【0028】そして光ファイバ10のコア11内を伝搬してきた光は、コア11の端面から集光されるように出射され、光導波路コア11内に入射される。

【0029】以上のようにこの実施例によれば、コア11の端面を凸レンズ状に形成したので光ファイバ10のコア11と光導波路コア17の結合効率が良くなる。

【0030】またコア11の端面はクラッド13の端面よりも凹んでいるので、この光ファイバ10を図2に示すように光導波路基板15に接続した場合は光ファイバ10のクラッド13の端面だけが光導波路基板15に接触することとなる。つまりコア11の端面は光導波路コア17には接触せず、該端面が傷つくことはない。

【0031】さらに光ファイバ10の光導波路基板15との接触面はクラッド13の端面全体なのでその接触面積を十分にとることができ。従ってその接続固定が確実となり、しかも通常のバッドジョイント法で接続できるので接続作業が簡単となる。

【0032】ところで従来、光ファイバ先端にレンズ効果を持たせたものとして先球ファイバがある。しかしながらこの先球ファイバの端面形状はその端面全体が円錐状やテーパー状となっているため、この端面を光導波路コアに接続する際は、両者間の接触面積がとれない。このために別にガイド部材等が必要となる。また先球ファイバのコア端面は直接光導波路コアに接続する場合があるので、該先端の取り扱いに注意を払わなければならぬ。一方上記実施例の場合、上述のようにこのような問題点を全て解消できる。

【0033】図3は本発明の他の実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。即ち同図(a)乃至(c)に示す実施例は、いずれも上記図1に示す実施例と同様に、コア11の端面をクラッド13の端面よ

り凹ませるとともにコア11の端面を凸レンズ状に形成して構成されている。

【0034】但し同図(a)の実施例の場合は、コア11の端面の中央部がクラッド13の端面と同じ面上に位置するようにしている。この場合でもコア11の端面はクラッド13の端面から突出していないので、上記図1に示す実施例の場合と同様の作用効果を生ずる。

【0035】また同図(b)に示す実施例の場合は、コア11の端面の形状を球面とせず、非球面としている。このように構成しても図1に示す実施例と同様の作用効果を生ずる。即ち本発明においてはコア端面の凸レンズの形状は球面でも非球面でも良く、要は光導波路コア等との接続に適切な形状を選択すれば良いのである。

【0036】また同図(c)に示す実施例の場合は、コア11端面の凹みの部分に、クラッド13の端面まで樹脂21を充填している。この樹脂21の材質は使用する光の波長に対して透明であることが必要である。

【0037】そしてこの実施例の場合はこの樹脂21の屈折率を適当に選択することによって、コア11から出射される光のビーム径を変化させることができる。即ち、ビーム径を絞るためには樹脂21の屈折率はコア11の屈折率よりも小さくしなければならず、またビーム径を広げるためには樹脂21の屈折率はコア11の屈折率よりも大きくしなければならない。

【0038】図4は本発明のさらに他の実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。即ち同図(a)、(b)の実施例の場合は、コア11の端面を平面状とし、その端面にレンズ部材23、25を取り付けて構成されている。このレンズ部材23、25は半球レンズをコア11端面に接着して構成しても良いし、コア11端面に樹脂を半球状となるように付着させ硬化させて構成してもよい。この実施例の場合でもレンズ部材23、25の表面がクラッド13の端面から突出しないようにすれば、上記図1に示す実施例と同様の作用効果が生じる。

【0039】図5は本発明のさらに他の実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。即ち同図(a)、(b)の実施例の場合は、コア11の端面の形状を凹面形状とし、該コア11の端面上に樹脂からなるレンズ部材27、29を付着してその表面の形状を凸レンズ形状となるようにしたものである。

【0040】〔第2発明〕図6は本発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す図であり、同図(a)は側断面図、同図(b)は右側面図である。同図に示すようにこの実施例においては、光ファイバ30のコア31の径をその端部において拡大する(通常のコア径の約5倍程度まで可能)とともに、該光ファイバ30の端面に例えばフレネルゾーンのようなレンズ機能を持つ格子からなるレンズ手段33を付着している。これによって光ファイバ30のコア31内を伝搬してきた光は、その

端面において絞り込まれる。その絞り込みの効率を上げるためにには該格子をブレーザード化するとよい。また焦点距離等のレンズ機能の調整は格子ピッチを変えることにより行える。

【0041】図7は本発明の他の実施例を示す図であり、同図(a)は側断面図、同図(b)は右側面図である。同図に示す実施例の場合も、上記図6に示す実施例の場合と同様に、コア37の径をその端部において拡大するとともに光ファイバ35の端面にレンズ手段39を取り付けている。但しこの実施例の場合のレンズ手段39は、光ファイバ35の端面に透過性高屈折率材料からなる樹脂を付着させることによって形成される。付着した樹脂はその表面張力によって球状の面を持ち、これによってレンズ効果を持つものであり、その曲率半径は樹脂の粘性と量によって設定される。なお場合によっては該樹脂の表面を研磨しても良い。

【0042】図8は本発明のさらに他の実施例を示す図であり、同図(a)は側断面図、同図(b)は右側面図である。同図に示す実施例の場合も、上記図6に示す実施例の場合と同様に、コア43の径をその端部において拡大するとともに光ファイバ41の端面にレンズ手段45を取り付けている。但しこの実施例の場合には光ファイバ41の端面の一部(少なくともコア43の端面全面を含む)を球面状にエッチングし、そこに透過性高屈折率材料からなる樹脂を充填することによってレンズ手段45を設けたものである。この場合のレンズ特性は、コア43のエッチング量とレンズ手段45の表面の曲率により設定される。

【0043】上記図6、7、8に示す光ファイバ30、35、41は、レーザダイオードや発光ダイオード等の光源と接続したり、または光学素子を介した接続系(下記する図9で示す)に用いることにより、高効率な接続部が構成できる。その理由としては、まずコア拡大部によりこの光ファイバ30、35、41の有効開口口径が大きくなっている、しかも付着したレンズ手段によって該拡大したコア径以上に光ファイバへの入射開口口径が大きくなっているからである。

【0044】図9は上記図7に示す光ファイバ35(他の光ファイバ30、41でもよい)を利用して光ファイバの伝送系の途中に光学素子を挿入した場合の具体例を示す概略側面図である。即ち、光学素子47(例えば光アイソレータ)の両側には2本の光ファイバ35、35がその端面を対向するように配置され、これら2本の光ファイバ35、35と光学素子47はサポート49で一体に固定されている。この発明においては光ファイバ35の端部のコア径が拡大されしかもレンズ手段45が設けられているので、長焦点距離がとれ、2本の光ファイバ35、35間に容易に光学素子47が設置できるのである。

【0045】ところで上記図7、8に示す実施例におい

ては光ファイバ35, 41の端面全体にレンズ手段39, 45を付着したが、レンズ手段は光ファイバ端面のコアを覆う大きさであればその全面に付着しなくてもよい。

【0046】以上のように上記図6, 7, 8に示す光ファイバ30, 35, 41は、光ファイバ端面にレンズ手段を付着させるだけで構成できるので、構造が単純であり、製作も容易である。またいずれも入射開口径が大きく、これを他の光学系に接続する際の位置調整が容易で、結合効率も高い。さらに上述のように本発明にかかる光ファイバ30, 35, 41は長焦点距離がとれるので、2本の光ファイバ間に容易に光学素子を設置できる。

【0047】【第3発明】図10は本発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す図であり、同図(a)は側断面図、同図(b)は同図(a)に示す光ファイバの屈折率分布を示す図である。

【0048】この光ファイバ51は、該光ファイバ51の端部のクラッド55を除去してコア53を所定長さだけ露出させ、該露出したコア53の周囲にクラッド55の屈折率よりも小さい屈折率からなる樹脂57をモールドし、さらにその端面をコア53の端面とともに研磨して構成されている。

【0049】ここで図11はこの光ファイバ51の製造方法を示す図である。この光ファイバ51を製造するにはまず同図(a)に示す光ファイバ51を用意する。この光ファイバ51のコア53は純粋石英で構成され、クラッド55は石英にフッ素を添加して構成されている。*

$$\omega_0 = A (0.65 + 1.619V + 2.879V^2)$$

1/2

$$V = 2\pi a (n_1^2 - n_2^2) / \lambda$$

但し、A:コア径

a:コア半径

V:規格化周波数

n_1 :コア屈折率

n_2 :クラッド屈折率

で表される。つまりコア屈折率とクラッド屈折率の差が大きくなるほど光のスポット径は小さくなる。

【0055】従ってこの光ファイバ51を例えば光導波路に接続する場合は、該光導波路のモードフィールド径に合わせて、所望のスポットサイズとなるように、光ファイバ51に用いる樹脂57の屈折率を選択すれば良い。このように樹脂57の屈折率を選択してそのモードフィールド径を調整すれば、結合効率の高い接続を行うことができる。

【0056】以上のようにこの発明によれば、微細加工等の複雑な工程なしに容易に光ファイバ端部のスポットサイズを調整できる。

*なおこの光ファイバ51のコア53とクラッド55の材料構成はこの実施例に限定されない。即ちコア53よりもクラッド55のドーバント添加量が多い材料構成となっているものであれば良い。

【0050】次に、この光ファイバ51の端部をガラスエッティング溶液(例えばHF溶液)を用いてエッティング処理する。この光ファイバ51のクラッド55には屈折率を下げるためのドーバントが添加されているので、コア53とクラッド55ではエッティング速度が異なり、コア53よりもクラッド55の方が速くエッティングされていく。このため、同図(b)に示すように、光ファイバ51の端部には、コア53が露出する。

【0051】次に同図(c)に示すようにこのコア53の露出した部分の周囲にクラッド55よりもさらに屈折率の低い樹脂57をモールドする。

【0052】そして同図(d)に示すようにコア53の端面を樹脂57とともに研磨して、その端面形状を調整する。これによって光ファイバ51は図10に示す構造となる。

【0053】図10(b)はこの光ファイバ51のコア53とクラッド55と樹脂57の屈折率分布を示している。同図に示すように、樹脂57をモールドした部分は、コア53との比屈折率差が大きくなっている。このように構成することにより光ファイバ51の端部における光のスポットサイズを小さくすることができる。

【0054】即ち一般に光ファイバ伝搬光のスポットサイズ ω_0 は、

$$-1.5 \quad -6$$

【0057】図12は本発明の他の実施例を示す図であり、同図(a)は側断面図、同図(b)は同図(a)に示す光ファイバの屈折率分布を示す図である。この光ファイバ61において前記図10に示す光ファイバ51と相違する点は、コア63の露出長さが長く、これに伴って樹脂67のモールド長さも長い点のみである。その他の点は前記図10に示す光ファイバ51と同様である。

【0058】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明にかかる光ファイバの端部構造によれば、以下のような優れた効果を有する。

①光ファイバのコアの端面を該光ファイバのクラッドの端面よりも凹め、且つ該コア端面の形状或いは該コア端面に取り付けられるレンズ部材の表面形状を凸面形状に形成した光ファイバにおいては、該光ファイバから出射される光のスポットサイズを小さくでき、他の光学部品との結合効率が良くなる。

【0059】またコア端部がレンズ効果を持った構造であるにもかかわらず、該コア端面がクラッド端面よりも凹んだ位置にあるためコアの端面が傷つくことはなく、しかも他の光学部品との接触面積を十分にとることができるので、安定した接続固定が行える。

【0060】の光ファイバの端部のコア径を拡大し且つ該コア径を拡大したコアの端面に直接レンズ手段を取り付けた構造の光ファイバにおいては、その構造が単純であり、製作も容易である。またこの光ファイバを他の光学系に接続する際の位置調整が容易で、結合効率も高い。さらにこの光ファイバは長焦点距離がとれるので、2本の光ファイバ間に光学素子を容易に設置できる。

【0061】③光ファイバの端部のクラッドを除去してコアを所定長さだけ露出させ、該露出したコアの周囲にクラッドの屈折率よりも小さい所望の屈折率の樹脂をモールドした光ファイバにおいては、該光ファイバから出射される光のスポットサイズを容易に調整できる。しかもこの光ファイバの製作には微細加工等の複雑な工程は不要である。

【図面の簡単な説明】

【図1】第1発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。

【図2】光ファイバ10の端部を光導波路コア17に接続したときの接続構造を示す概略側断面図である。

【図3】本発明の他の実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。

【図4】本発明のさらに他の実施例にかかる光ファイバ*

*の端部構造を示す側断面図である。

【図5】本発明のさらに他の実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す側断面図である。

【図6】第2発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す図である。

【図7】本発明の他の実施例を示す図である。

【図8】本発明のさらに他の実施例を示す図である。

【図9】図7に示す光ファイバ35を利用して光ファイバの伝送系の途中に光学素子を挿入した場合の具体例を示す概略側面図である。

【図10】第3発明の1実施例にかかる光ファイバの端部構造を示す図である。

【図11】光ファイバ51の製造方法を示す図である。

【図12】本発明の他の実施例を示す図である。

【符号の説明】

10 光ファイバ

11 コア

13 クラッド

23, 25, 27, 29 レンズ部材

20 30, 35, 41 光ファイバ

31, 37, 43 コア

33, 39, 45 レンズ手段

51, 61 光ファイバ

53, 63 コア

55, 65 クラッド

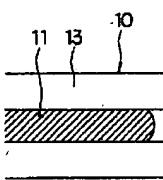
57, 67 樹脂

【図1】

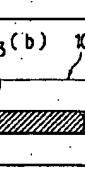
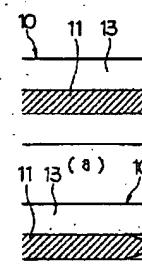
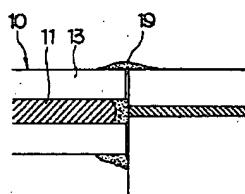
【図2】

【図3】

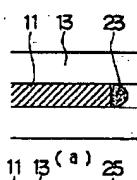
【図4】



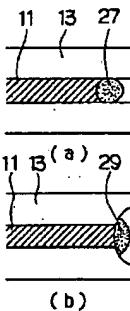
【図5】



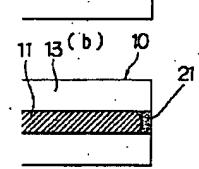
(a)



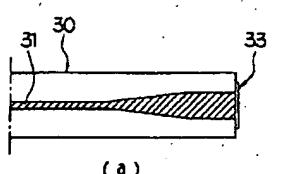
(b)



(b)

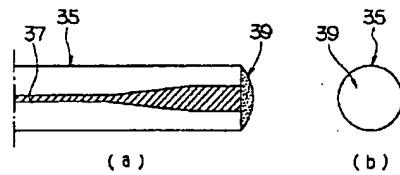


(c)

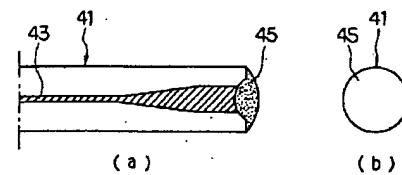


【図6】

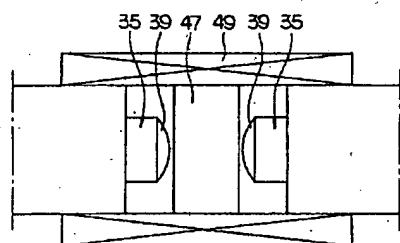
【図7】



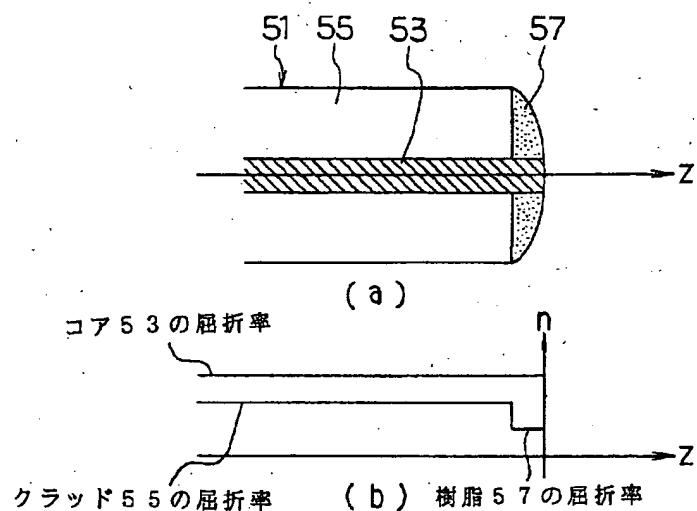
【図8】



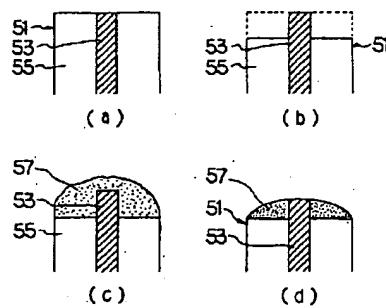
【図9】



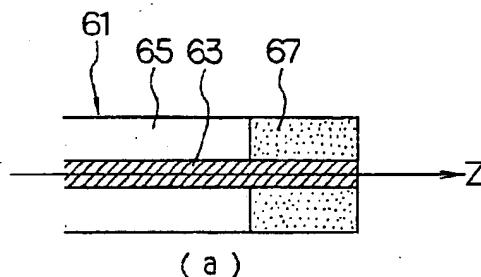
【図10】



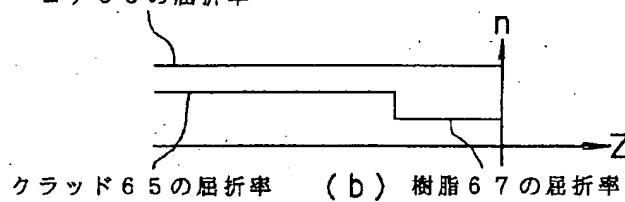
【図11】



【図12】



コア63の屈折率



クラッド65の屈折率 (b) 樹脂67の屈折率

Date: November 25, 2003

Declaration

I, Michihiko Matsuba, President of Fukuyama Sangyo Honyaku Center, Ltd., of 16-3, 2-chome, Nogami-cho, Fukuyama, Japan, do solemnly and sincerely declare that I understand well both the Japanese and English languages and that the attached document in English is a full and faithful translation, of the copy of Japanese Unexamined Patent No. Hei-5-107428 laid open on April 30, 1993.



Michihiko Matsuba

Fukuyama Sangyo Honyaku Center, Ltd.

End structure of optical fiber and method for manufacturing
the same

Japanese Unexamined Patent No. Hei-5-107428

Laid-open on: April 30, 1993

Application No. Hei-3-297900

Filed on: October 18, 1991

Inventor: Akira KASHIWAZAKI

Michitaka OKUDA

Applicant: Kyocera Corporation

SPECIFICATION

[TITLE OF THE INVENTION]

End structure of optical fiber and method for manufacturing
the same

[Abstract]

[Object] To provide an end structure of an optical fiber that
can be easily machined and that can be stably and highly
efficiently connected to another optical component.

[Structure] An end face of a core 11 of an optical fiber 10
is inward from an end face of a clad 13 of the optical fiber
10, and the shape of the end face of the core 11 is formed in
a convex shape so as not to project from the end face of the

clad 13. Accordingly, the spot size of light emitted from the optical fiber 10 can be made to be small and have a high degree of coupling efficiency with respect to another optical component. Further, since the end face of the core 11 is inward from the end face of the clad 13, no damage to the end face of the core 11 occurs.

[WHAT IS CLAIMED IS;]

[Claim 1] An end structure of an optical fiber, wherein an end face of a core of an optical fiber that is connected to another optical component is inward from an end face of a clad of the optical fiber, and a shape of the end face of the core or a surface shape of a lens member that is attached to the end face of the core is formed in a convex shape so as not to project from the end face of the clad.

[Claim 2] An end structure of an optical fiber, wherein a core diameter of an end of an optical fiber that is connected to another optical component is enlarged, and a lens means is attached directly to an end face of the core whose core diameter has been enlarged.

[Claim 3] An end structure of an optical fiber, wherein a core is exposed by a predetermined length by removing a clad of an end of an optical fiber that is connected to another optical component, and resin having a desired refractive index smaller

than a refractive index of the clad is molded onto the periphery of the core that has been exposed.

[Claim 4] A method for manufacturing an end of an optical fiber comprising; a step of exposing a core by a predetermined length by removing a clad of the end of the optical fiber that is connected to another optical component by means of etching, a step of molding resin having a desired refractive index smaller than a refractive index of the clad onto the periphery of the core that has been exposed, and a step of grinding an end face of the core together with the resin.

[DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION]

[0001]

[Field of the Invention] The present invention relates to an end structure of an optical fiber suitable for connection to an optical waveguide or other optical fibers and relates to a manufacturing method thereof.

[0002]

[Prior Arts] Conventionally, connection loss occurs when an optical fiber is connected to an optical waveguide or another optical fiber. In single-mode fiber, the most significant cause that leads to this connection loss lies in a mismatch in mode field diameters therebetween. Therefore, the most effective means for connecting them together at high efficiency is to

match the mode field diameter of one of them with the other one. The following three methods can be mentioned as the method for doing so. Herein, a description is given of a case in which a connection is made between an optical fiber and an optical waveguide.

[0003] ① Method for designing the structure of a connection end of an optical waveguide device so as to match the mode field diameter of an optical waveguide with the mode field diameter of an optical fiber.

[0004] For example, there is a method for structuring the end face of an optical waveguide so as to have a lens effect and allowing a beam from an optical fiber wider than the optical waveguide to be made incident on a core part of the optical waveguide by condensing the beam.

[0005] Additionally, there exists a method for connecting an auxiliary waveguide to a core part of an optical waveguide, then allowing all incident light from an optical fiber to be made incident on the auxiliary waveguide, and lastly propagating light to the core of the optical waveguide by use of distributed coupling (e.g., Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-55-2262, Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-60-172001, and Japanese Examined Patent Application Publication No. Sho-61-48695).

[0006] ② Method for designing the structure of a connection end of an optical fiber so as to match the mode field diameter of the optical fiber with the mode field diameter of an optical waveguide device.

[0007] For example, there is a method for improving the coupling efficiency of both by bringing the core shape of an end of an optical fiber close to the shape of a core part of an optical waveguide such that the fore end of the optical fiber is made spherical or such that the core shape in the vicinity of the end of the optical fiber is thinned or deformed (for example, made elliptic) (e.g., Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-57-100409, Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-57-30811, and Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-60-88909).

[0008] There is another method for improving the coupling efficiency with an optical waveguide by increasing the difference in the comparative refractive index between a clad and a core of an end of an optical fiber so as to reduce a spot size.

[0009] ③ Method for interposing a mode-field converting element, by which the mode field diameter of an optical fiber is caused to coincide with that of an optical waveguide device, between the optical fiber and the optical waveguide device

(e.g., Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-60-164708).

[0010] On the other hand, as another factor that causes connection loss, there exists a loss that is caused by end-face reflection resulting from a difference in the refractive index between an optical fiber and an optical waveguide, without being limited to a single mode or a multimode.

[0011] A method for coating the end face of an optical fiber or the end face of an optical waveguide with an antireflection film is employed as a means for preventing this reflection loss (e.g., Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-57-10409 and Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-60-164708).

[0012]

[Themes to be Solved by the Invention] However, the aforementioned conventional techniques have the following problems. In the conventional technique ①, a microfabrication technique is required onto a board of the optical waveguide, which must be performed with high accuracy.

[0013] For example, when an auxiliary waveguide is connected to the optical waveguide by distributed coupling, the rate (percentage of coupling) at which the power of light admitted to the auxiliary waveguide from the optical fiber shifts to

the optical waveguide periodically changes with respect to a connected distance between the optical waveguide and the auxiliary waveguide. Therefore, great coupling efficiency cannot be obtained if a connected length therebetween is not determined accurately according to the design.

[0014] In the conventional technique ②, it is not easy to machine an optical fiber with high accuracy. In addition thereto, when the optical fiber whose tip is spherically shaped is fixed to the end face of an optical waveguide, its fixing method is not as easy as a method for fixing an ordinary optical fiber to an optical waveguide (i.e., a method for butting an ordinary optical fiber directly against an optical waveguide and fixing them together with an adhesive).

[0015] Likewise, in the conventional technique ③, accuracy is required to design a mode field converting element itself, and, unless its accuracy is precisely created, excellent coupling efficiency cannot be obtained. Additionally, the number of faces to be connected reaches two, i.e., a place between the optical fiber and the mode field converting element and a place between the mode field converting element and the optical waveguide, thus increasing the number of places where connection loss occurs.

[0016] On the other hand, in a case in which an antireflection

film is used to prevent reflection loss, the cost is high, and the thickness of the antireflection film must be controlled with high accuracy.

[0017] The present invention has been made in consideration of the foregoing respects, and aims to provide an end structure of an optical fiber that can be easily machined and that can be connected to another optical component stably and at high efficiency and provide a manufacturing method thereof.

[0018]

[Means for Solving Themes] To solve the aforementioned problems, the present invention is made such that an end face of a core 11 of an optical fiber 10 is situated inward from an end face of a clad 13 of the optical fiber 10, and a shape of the end face of the core 11 or a surface shape of a lens member 23 attached to the end face of the core 11 is formed in a convex shape so as not to project from the end face of the clad 13.

[0019] Additionally, the present invention is made such that the diameter of a core 31 of an end of an optical fiber 30 is enlarged, and a lens means 33 is attached directly to an end face of the core 31 whose core diameter has been enlarged.

[0020] Additionally, the present invention is made such that a core 53 is exposed by a predetermined length by removing a clad 55 of an end of an optical fiber 51, and resin 57 having

a desired refractive index smaller than a refractive index of the clad 55 is molded onto the periphery of the core 53 that has been exposed.

[0021]

[Action] In the optical fiber 10 in which the end face of the core 11 of the optical fiber 10 is situated inward from the end face of the clad 13 of the optical fiber 10, and the shape of the end face of the core 11 or the surface shape of the lens member 23 attached to the end face of the core 11 is formed in a convex shape, the lens effect of the end of the optical fiber 10 makes it possible to reduce the spot size of light emitted from the optical fiber 10 and to improve the coupling efficiency with another optical component. Additionally, since the end face of the core 11 is situated inward from the end face of the clad 13, the end face of the core 11 is never damaged and, since a contact area with another optical component can be sufficiently taken, they can be stably connected and fixed together.

[0022] In the optical fiber 30 structured such that the diameter of the end of the core 31 is enlarged, and the lens means 33 is attached directly to the end face of the core 31 whose core diameter has been enlarged, its effective opening diameter is enlarged by the enlarged part of the core, and an incidence

opening diameter to the optical fiber 30 can be made greater than the enlarged core diameter by the lens means 33 attached thereto. Therefore, when this optical fiber 30 is connected to another optical system, positioning is easily performed, and the coupling efficiency is high. Additionally, this optical fiber can assume a long focal length.

[0023] In the optical fiber 50 structured such that the core 53 is exposed by a predetermined length by removing the clad 55 of the end, and the resin 57 is molded onto the periphery of the core 53 that has been exposed, a difference in the refractive index between the core 53 and the resin 57 can be made greater than a difference in the refractive index between the core 53 and the clad 55. Therefore, the spot size of light emitted from the optical fiber 50 can be reduced.

[0024]

[Preferred Embodiments] Embodiments of the present invention will be hereinafter described in detail based on the drawings.

[0025] [First invention] Fig. 1 is a sectional side view that shows the end structure of an optical fiber according to an embodiment of the present invention. As shown in this figure, the end face of a core 11 of this optical fiber 10 is not flush with the end face of a clad 13, and the end face of the core 11 is situated inward from the end face of the clad.

Additionally, the shape of the end face of this core 11 is formed like a convex lens (spherically). What is needed to form this structure is to etch the end face of the optical fiber 10.

[0026] This structure makes it possible to stop down and reduce a beam spot of light emitted from the end face of the core 11 of the optical fiber 10.

[0027] Fig. 2 is a schematic sectional side view that shows a connection structure formed when the end of the optical fiber 10 is connected to a core 17 of an optical waveguide provided in an optical-waveguide board 15. As shown in this figure, the optical fiber 10 is bonded and fixed with an adhesive 19 so that the optical axis of its core 11 coincides with the optical axis of the optical-waveguide core 17.

[0028] Light that has traveled through the core 11 of the optical fiber 10 is emitted from the end face of the core 11 so as to be condensed, and is made incident on the optical-waveguide core 17.

[0029] As mentioned above, according to this embodiment, the end face of the core 11 is formed like a convex lens, and therefore the coupling efficiency between the optical-waveguide core 17 and the core 11 of the optical fiber 10 is improved.

[0030] Additionally, since the end face of the core 11 is

situated inward from the end face of the clad 13, only the end face of the clad 13 of the optical fiber 10 comes in contact with the optical-waveguide board 15 when this optical fiber 10 is connected to the optical-waveguide board 15 as shown in Fig. 2. In other words, the end face of the core 11 does not come in contact with the optical-waveguide core 17, and the end face thereof is never damaged.

[0031] Additionally, since a contact surface of the optical fiber 10 with the optical-waveguide board 15 is the entire end face of the clad 13, a contact area thereof can be sufficiently taken. Therefore, the contact surface can be reliably connected and fixed and can be connected according to a conventional butt joint method, and therefore connecting work becomes easy.

[0032] Furthermore, conventionally, a rounded-end fiber exists as an optical fiber whose tip has a lens effect. However, since the entire end face of this rounded-end fiber is shaped like a cone or a taper, a contact area cannot be taken between this end face and an optical-waveguide core when they are connected together. For this reason, there is a need to use a guide member or a similar member as an independent element. Additionally, since a case may occur in which the end face of the core of the rounded-end fiber comes in contact directly with the optical-waveguide core, it is necessary to pay

attention to the processing of the tip thereof. In contrast, in the aforementioned embodiment, these problems can all be solved as described above.

[0033] Fig. 3 is a sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to another embodiment of the present invention. That is, like the embodiment shown in Fig. 1, embodiments shown in (a) to (c) of this figure are each formed such that the end face of the core 11 is situated inward from the end face of the clad 13, and the end face of the core 11 is shaped like a convex lens.

[0034] However, in the embodiment of (a) of this figure, the central part of the end face of the core 11 is flush with the end face of the clad 13. Likewise, in this case, the end face of the core 11 does not protrude from the end face of the clad 13, and therefore an operational effect identical to that of the embodiment shown in Fig. 1 is achieved.

[0035] In the embodiment shown in (b) of this figure, the shape of the end face of the core 11 is formed to be not spherical but aspherical. Even in this structure, an operational effect identical to that of the embodiment shown in Fig. 1 is achieved. That is, in the present invention, what is needed is to select an appropriate shape for a connection with, for example, an optical-waveguide core, regardless of whether the shape of the

convex lens of the end of the core is formed to be spherical or aspherical.

[0036] In the embodiment shown in (c) of this figure, a hollow part of the end face of the core 11 up to the end face of the clad 13 is filled with resin 21. The material of this resin 21 is required to be transparent with respect to the wavelength of light used.

[0037] In this embodiment, the beam diameter of light emitted from the core 11 can be changed by suitably selecting the refractive index of this resin 21. That is, in order to reduce the beam diameter, the refractive index of the resin 21 must be made smaller than that of the core 11, and, in order to increase the beam diameter, the refractive index of the resin 21 must be made greater than that of the core 11.

[0038] Fig. 4 is a sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to still another embodiment of the present invention. That is, in embodiments of (a) and (b) of this figure, the end face of the core 11 is shaped like a plane, and lens members 23 and 25 are attached to its end face. The lens members 23 and 25 may be formed by bonding hemispherical lenses to the end face of the core 11 or may be formed by attaching resin onto the end face of the core 11 and hardening it so as to become hemispherical. Even

in this embodiment, an operational effect identical to that of the embodiment shown in Fig. 1 is achieved by causing the surfaces of the lens members 23 and 25 not to protrude from the end face of the clad 13.

[0039] Fig. 5 is a sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to still another embodiment of the present invention. That is, in embodiments of (a) and (b) of this figure, the shape of the end face of the core 11 is formed to be concave, and its surface is shaped like a convex lens by attaching resin-made lens members 27 and 29 onto the end face of the core 11.

[0040] [Second invention] Fig. 6 is a view that shows an end structure of an optical fiber according to an embodiment of the present invention, in which (a) is a sectional side view, and (b) is a right side view. As shown in this figure, in this embodiment, the diameter of a core 31 of an optical fiber 30 is increased at its end (which can be about five times as large as an ordinary core diameter), and a lattice-made lens means 33 that has a lens function, such as a Fresnel zone, is attached to the end face of the optical fiber 30. Thereby, light that has traveled through the core 31 of the optical fiber 30 is narrowed at its end face. The best way of improving its narrowing efficiency is to braze the lattice. The lens function,

such as a focal length, can be adjusted by changing a lattice pitch.

[0041] Fig. 7 is a view that shows another embodiment, in which (a) is a sectional side view, and (b) is a right side view. As in the embodiment shown in Fig. 6, in the embodiment shown in this figure, the diameter of the core 37 is increased at its end, and a lens means 39 is attached to the end face of an optical fiber 35. It is to be noted that the lens means 39 in this embodiment is formed by allowing resin made of a permeable high-refractive-index material to adhere to the end face of the optical fiber 35. The resin adhered thereto has a spherical surface by its surface tension, thus having a lens effect. Its curvature radius is determined according to the viscosity and the amount of the resin. According to circumstances, the surface of the resin may be ground.

[0042] Fig. 8 is a view that shows still another embodiment of the present invention, in which (a) is a sectional side view, and (b) is a right side view. As in the embodiment shown in Fig. 6, in the embodiment shown in this figure, the diameter of the core 43 is increased at its end, and a lens means 45 is attached to the end face of an optical fiber 41. However, in this embodiment, a part (including at least the entire end face of the core 43) of the end face of the optical fiber 41

is spherically etched, and this place is filled with resin made of a permeable high-refractive-index material, thus disposing the lens means 45. Lens characteristics in this case are determined by the amount of etching of the core 43 and by the curvature of the surface of the lens means 45.

[0043] The optical fibers 30, 35, and 41 shown in Figs. 6, 7, and 8 can form highly effective connecting parts by connecting them to a source of a laser diode or a light emitting diode or by being used for a connecting system (shown in Fig. 9 described later) through an optical element. First, the reason is that the effective opening diameters of the optical fibers 30, 35, and 41 are increased by a core enlarging part, and, second, the reason is that the incidence opening diameter to the optical fiber is made greater by the lens means adhered thereto than the increased core diameter.

[0044] Fig. 9 is a schematic side view that shows a concrete example of a case in which an optical element is inserted somewhere in a transmission system of the optical fiber by use of the optical fiber 35 (alternatively, the optical fiber 30 or 41) shown in Fig. 7. That is, two optical fibers 35 and 35 are disposed on both sides of an optical element 47 (e.g., optical isolator) so that their end faces can face each other, and the two optical fibers 35 and 35 and the optical element

47 are fixed together by a supporter 49. In this invention, the core diameter of the end of the optical fiber 35 is increased, and the lens means 45 is provided, thereby making it possible to assume a long focal length and to easily interpose the optical element 47 between the two optical fibers 35 and 35.

[0045] Furthermore, although the lens means 39 and 45 are attached to the entire end faces of the optical fibers 35 and 41 in the embodiments shown in Fig. 7 and Fig. 8, the lens means does not need to be attached to its entire face if they are large enough to cover the core of the end of the optical fiber.

[0046] As mentioned above, since the optical fibers 30, 35, and 41 shown in Figs. 6, 7, and 8 can be formed only by attaching the lens means onto the end face of the optical fiber, the structure is simple, and they can be easily manufactured. Additionally, each of them has a large incidence opening diameter, and, when they are connected to other optical systems, positioning is easily performed, and coupling efficiency is high. Additionally, as mentioned above, the optical fibers 30, 35, and 41 according to the present invention can assume a long focal length, and therefore an optical element can be easily interposed between two optical fibers.

[0047] [Third invention] Fig. 10 is a view that shows an end structure of an optical fiber according to an embodiment of

the present invention, in which (a) is a sectional side view, and (b) is a view that shows a refractive-index distribution of an optical fiber shown in (a) of this figure.

[0048] This optical fiber 51 is structured such that a clad 55 of the end of the optical fiber 51 is removed so as to expose a core 53 by a predetermined length, and resin 57 whose refractive index is smaller than that of the clad 55 is molded onto the periphery of the core 53 that has been exposed, and its end face is ground together with the end face of the core 53.

[0049] Herein, Fig. 11 is a view that shows a manufacturing method of this optical fiber 51. In order to manufacture this optical fiber 51, the optical fiber 51 shown in (a) of this figure is first prepared. The core 53 of this optical fiber 51 is made of pure quartz, and the clad 55 is made by adding fluorine to quartz. The material composition of the clad 55 and the core 53 of this optical fiber 51 is not limited to this embodiment. That is, what is needed is to form a material composition in which the clad 55 is greater than the core 53 in the amount of addition of a dopant.

[0050] Thereafter, the end of this optical fiber 51 is etched by use of a glass etching solution (e.g., HF solution). Since a dopant to lower a refractive index has been added to the clad

55 of the optical fiber 51, the etching rate of the core 53 differs from that of the clad 55, and the clad 55 is etched faster than the core 53. Therefore, as shown in (b) of this figure, the core 53 is exposed at the end of the optical fiber 51.

[0051] Thereafter, as shown in (c) of this figure, resin 57 whose refractive index is lower than that of the clad 55 is molded onto the periphery of the exposed part of the core 53.

[0052] Thereafter, as shown in (d) of this figure, the end face of the core 53 is ground together with the resin 57, and the shape of the end face is adjusted. As a result, the optical fiber 51 is structured as shown in Fig. 10.

[0053] Fig. 10(b) shows a refractive-index distribution among the resin 57, the clad 55, and the core 53 of this optical fiber 51. As shown in this figure, a part where the resin 57 has been molded is large in the comparative refractive index difference with respect to the core 53. This structure makes it possible to reduce the spot size of light at the end of the optical fiber 51.

[0054] That is, generally, a spot size ω_0 of light that travels through an optical fiber is expressed as follows:

$$\omega_0 = A(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})$$

$$V = 2\pi a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda$$

wherein A is a core diameter, a is a core radius, V is a standardized frequency, n₁ is a core refractive index, and n₂ is a clad refractive index. That is, the spot diameter of light becomes smaller proportionately with a rise in difference between the core refractive index and the clad refractive index.

[0055] Therefore, when this optical fiber 51 is connected to, for example, an optical waveguide, the refractive index of the resin 57 used in the optical fiber 51 should be selected to obtain a desired spot size in accordance with the mode field diameter of the optical waveguide. It is possible to make a connection with high coupling efficiency by selecting the refractive index of the resin 57 in this way and by adjusting its mode field diameter.

[0056] As mentioned above, according to this invention, the spot size of an end of an optical fiber can be easily adjusted without a complex step like a microfabrication process.

[0057] Fig. 12 is a view that shows another embodiment of the present invention, in which (a) is a sectional side view, and (b) is a view that shows a refractive-index distribution of an optical fiber shown in (a). This optical fiber 61 differs from the optical fiber 51 shown in Fig. 10 only in the fact that the length of an exposed part of a core 63 is longer, and,

accordingly, the mold length of resin 67 is longer. As to respects other than this, the optical fiber 61 is identical to the optical fiber 51 shown in Fig. 10

[0058]

[Effects of the Invention] As described in detail above, according to the end structure of the optical fiber according to the present invention, the following superior effects are achieved.

① In an optical fiber in which the end face of a core of an optical fiber is situated inward from the end face of a clad of the optical fiber, and the shape of the end face of the core or the surface shape of a lens member attached to the end face of the core is formed in a convex shape, the spot size of light emitted from the optical fiber can be reduced, and the coupling efficiency with another optical component can be improved.

[0059] Additionally, since the end face of the core is situated inward from the end face of the clad in spite of the fact that the end face of the core is structured to have a lens effect, the end face of the core is never damaged, and, since a contact area with another optical component can be sufficiently taken, they can be stably connected and fixed together.

[0060] ② In an optical fiber structured such that the core diameter of the end of the optical fiber is increased, and a

lens means is attached directly to the end face of the core whose core diameter has been increased, its structure is simple, and it can be easily manufactured. Additionally, when this optical fiber is connected to another optical system, positioning is easily performed, and the coupling efficiency is high. Additionally, since this optical fiber can assume a long focal length, an optical element can be easily interposed between two optical fibers.

[0061] ③ In an optical fiber structured such that a core is exposed by a predetermined length by removing a clad of the end of the optical fiber, and resin that has a desired refractive index smaller than that of the clad is molded onto the periphery of the core that has been exposed, the spot size of light emitted from the optical fiber can be easily adjusted. Additionally, a complex step like a microfabrication process is not needed to manufacture this optical fiber.

[BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS]

[Fig. 1] A sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to an embodiment of the first invention.

[Fig. 2] A schematic sectional side view that shows a connection structure formed when the end of an optical fiber 10 is connected to an optical-waveguide core 17.

[Fig. 3] A sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to another embodiment of the present invention.

[Fig. 4] A sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to still another embodiment of the present invention.

[Fig. 5] A sectional side view that shows an end structure of an optical fiber according to still another embodiment of the present invention.

[Fig. 6] A view that shows an end structure of an optical fiber according to an embodiment of the second invention.

[Fig. 7] A view that shows another embodiment of the present invention.

[Fig. 8] A view that shows still another embodiment of the present invention.

[Fig. 9] A schematic side view that shows a concrete example in a case in which an optical element is inserted somewhere in a transmission system of an optical fiber shown in Fig. 7 by use of the optical fiber 35.

[Fig. 10] A view that shows an end structure of an optical fiber according to an embodiment of a third invention.

[Fig. 11] A view that shows a manufacturing method of an optical fiber 51.

[Fig. 12] A view that shows another embodiment of the present invention.

[Description of Symbols]

10 Optical fiber

11 Core

13 Clad

23, 25, 27, 29 Lens member

30, 35, 41 Optical fiber

31, 37, 43 Core

33, 39, 45 Lens means

51, 61 Optical fiber

53, 63 Core

55, 65 Clad

57, 67 Resin

Fig.1

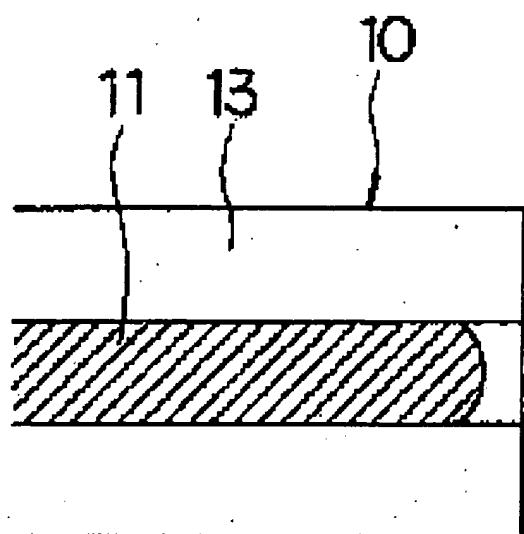


Fig.2

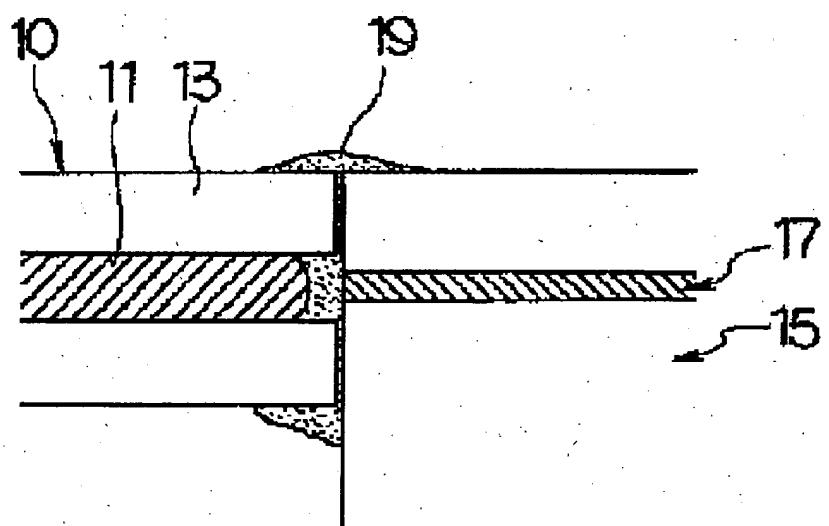


Fig.3

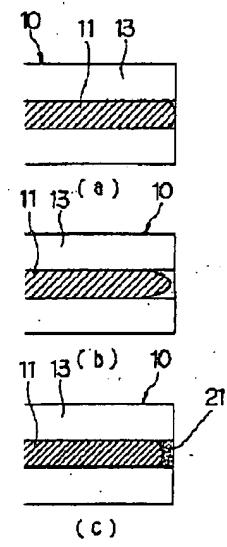


Fig.4

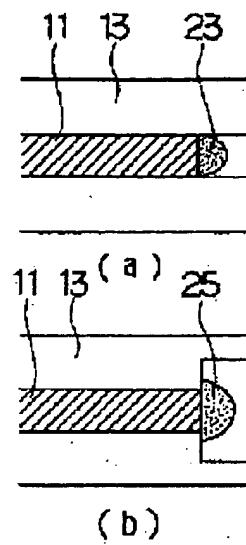


Fig.5

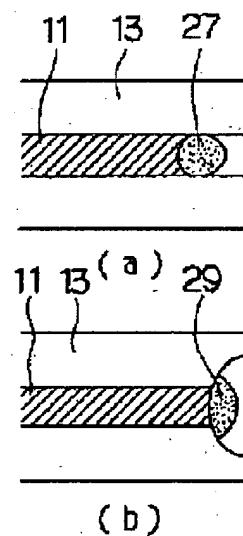


Fig.6

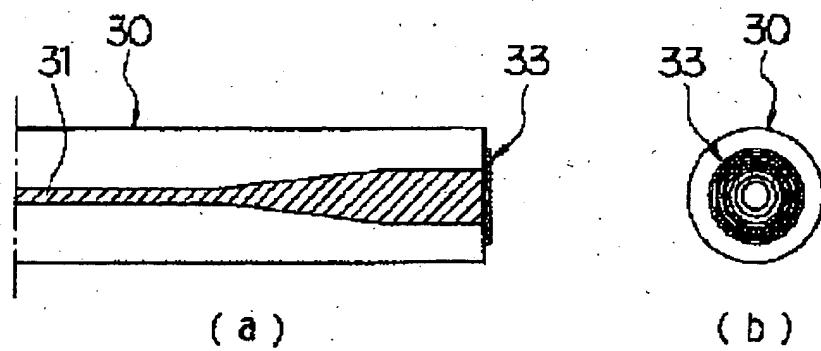


Fig.7

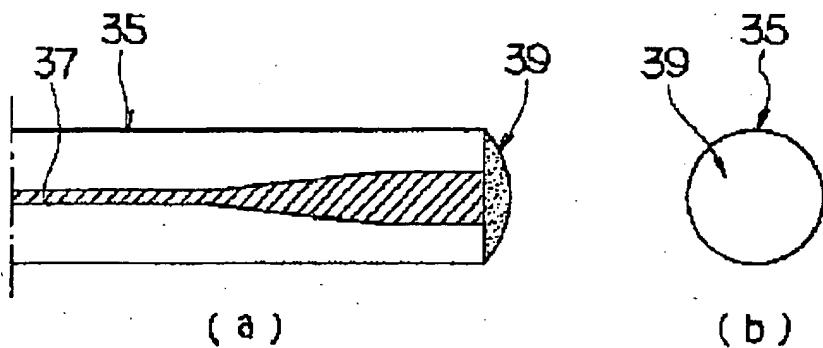


Fig.8

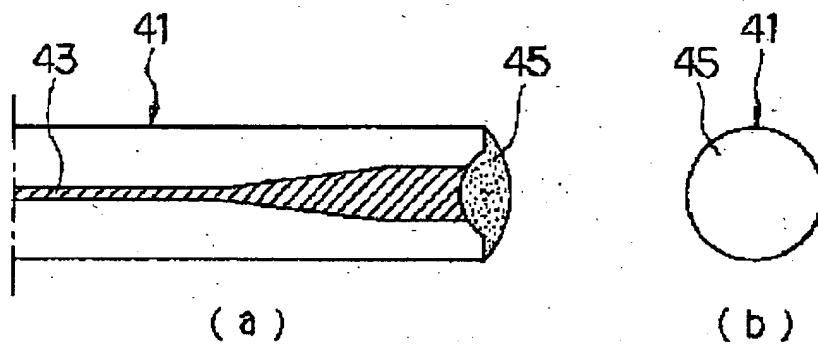


Fig.9

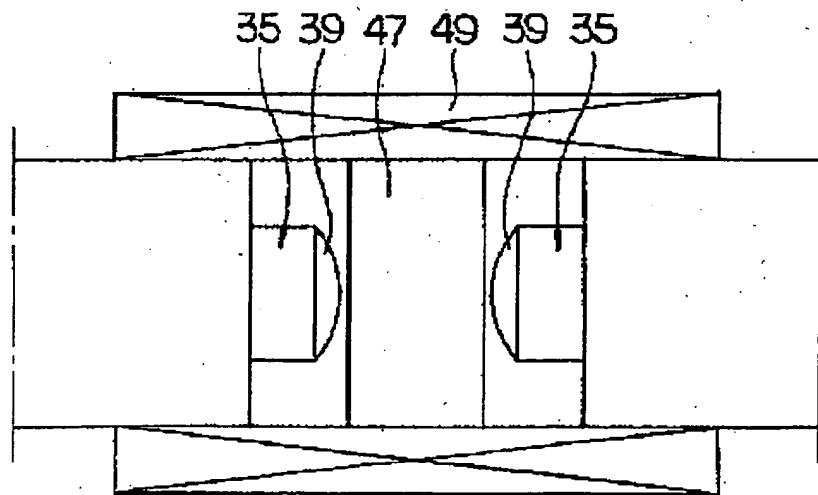


Fig.10

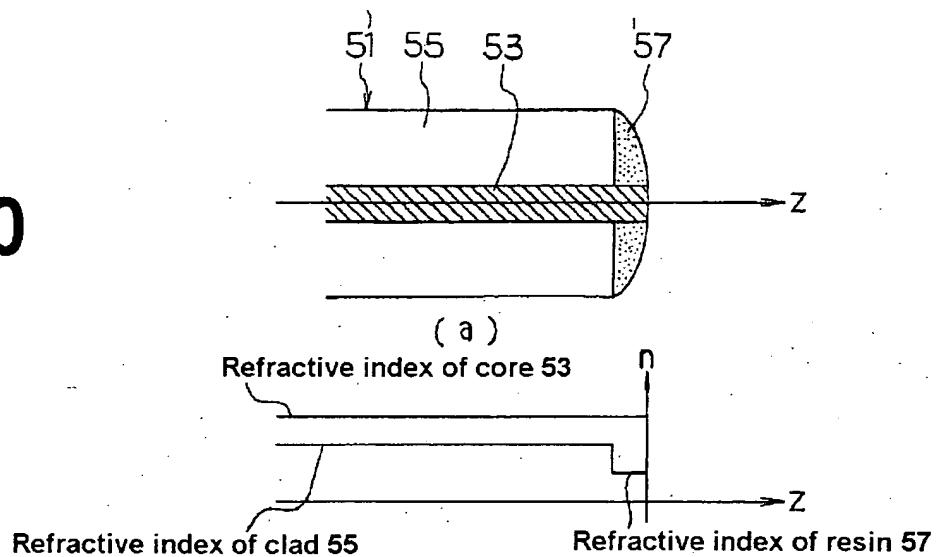


Fig.11

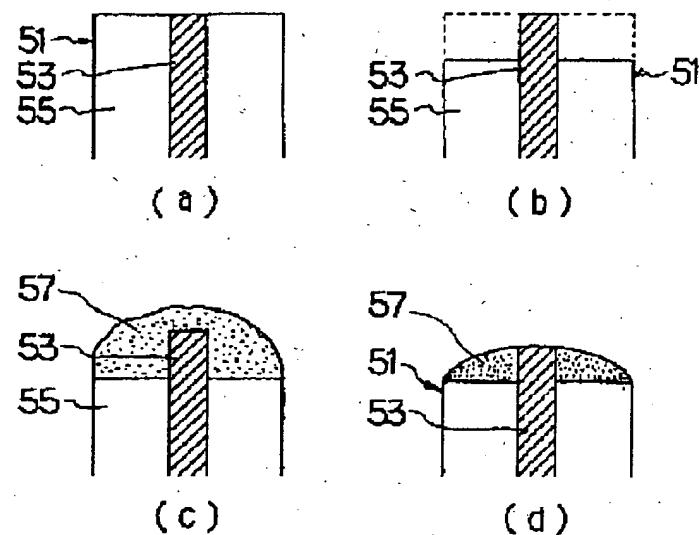


Fig.12

